

**A SUDBURY IMPAKT ESEMÉNY HATÁSÁRA LÉTREJÖTT ÉS AZ AZT FELÜLBÉLYEGZŐ
HIDROTERMÁS RENDSZEREK JELLEMZŐI, ÁTALAKULÁSAI, ÉS SZEREPÜK A SUDBURY
MAGMÁS KOMPLEXUM (KANADA) FEKÜKÖZETEIBEN TALÁLHATÓ „SZULFIDSZEGÉNY”
CU-(NI-)PLATINAFÉM ÉRCESEDÉSEK KIALAKULÁSÁBAN**

Tuba Györgyi

Tézisfüzet

Témavezetők:

Dr. Molnár Ferenc, habilitált egyetemi docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Ásványtani Tanszék, Budapest

Prof. David H. Watkinson, egyetemi tanár

Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa

Földtudományi Doktori Iskola, Földtan-Geofizika Doktori Program

Doktori Iskola vezetője: **Dr. Gábris Gyula**

Programvezető: **Dr. Mindszenty Andrea**



2012

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Budapest, Magyarország



Bevezetés és célkitűzés

Az 1.85 milliárd éves Sudbury-szerkezet a világ egyik legnagyobb meteorit kráterének maradványa, amely Ottawától mintegy 420 km-re keletre, Torontótól 340 km-re északra terül el. Geológiai szempontból három fő részre osztható: (1) a Sudbury Magmás Komplexumra (SMK), amely a becsapódáskor keletkezett olvadéktömegből kristályosodott ki, (2) a becsapódás során felszabadult sokkhullám következtében felbreccsásodott archai és huroni fekézőzet összletre, és (3) a SMK fedőjét alkotó Whitewater Formációcsoportra, amely a kráterbe visszahullott törmelékből és tengeri üledékekből áll.

A Sudbury-szerkezet Cu-(Ni-)platinafém tartalmú fekézőzet ércesedései körül az utóbbi 20 évben intenzíven fellendült a kutatás. Bár a telepek genetikai kapcsolatát a klasszikus sudbury-i Ni-Cu kontakt ércesedésekkel korán felismerték, a kapcsolatot kialakító folyamat jellege, a fém szállító média forrása és a szállítódási mechanizmus kérdése napjainkig nem egyértelműen tisztázott. A Sudbury Magmás Komplexum (SMK) hője által hajtott hidrotermás fluidumrendszer (Farrow és Watkinson, 1992; Ames és Gibson, 1995; Ames et al., 1998; Marshall et al., 1999; Molnár et al., 2001) jelenléte a fekézőzet ércesedésekben több területről igazolt, azonban annak szerepéről a fekéürcesedések létrejöttében megoszlottak a vélemények (pl. Farrow és Watkinson, 1992; Li és Naldrett, 1993a; Jago et al., 1994; Morrison et al., 1994; Marshall et al., 1999; Molnár et al., 2001; Hanley et al., 2005). A fekéürcesedések altípusokra való osztása óta (Farrow et al., 2005) a hidrotermás fluidumok általános szerepe elfogadottá vált, és a tanulmányok annak megítélésére fókuszálnak, hogy az egyes altípusok képződésében milyen arányban vettek részt magmás illetve hidrotermás folyamatok (Farrow et al., 2005; Leshar et al., 2009; Péntek et al., 2009; Kjarsgaard és Ames, 2010; Nelles et al., 2010; Tuba et al., 2010; Hanley et al., 2011; Péntek et al., 2012).

A „szulfidszegény” fekéürcesedés-típus vonzó nyersanyag-kutatási célpont nagy platinafém (PGE) tartalma miatt, amit jellegzetesen alacsony szulfidtartalom kísér (Farrow et al., 2005; Ames and Farrow, 2007). Bár a fekéürcesedésekben általánosan, szulfiddal megjelenő szilikátásványokat több dokumentáció is taglalja (pl. Farrow és Watkinson, 1992; Li és Naldrett, 1993a; Farrow, 1994; Everest, 1999; Molnár et al., 2001; Péntek et al., 2008), a „szulfidszegény” rendszerre oly jellemző, nagy platinafém tartalmú és uralkodóan szilikátokból álló ásványtársulások részletes vizsgálata nem történt meg. A „szulfidszegény” ércesedésekre irányuló nyersanyagkutatásban további problémát jelentett a térségben regionálisan megjelenő fiatalabb hidrotermás rendszerek (Marshall et al., 1999; Molnár et al., 2001) által létrehozott átalakulásoktól való elkülönítés. A különböző átalakulási események leírása és jellemzése tehát szükségessé vált.

Munkám során három „szulfidszegény” ércesedést hordozó területen készítettem részletes, nagy felbontású térképet hidrotermásan átalakult feltárásokról, melyek összterülete több mint 7400 m². A tér- és időbeli kapcsolatok és szöveti jellegzetességek meghatározásával a nyersanyag-kutatási szempontból perspektivikus ásványtársulások felismerése lehetővé vált, valamint kitűnt, hogy a fluidumokhoz kapcsolódó hidrotermás átalakulás mind a SMK-mal egyidős, mind az annál fiatalabb rendszerek esetében nagyobb volumenű és összetettebb, mint az addig az irodalomban tárgyalásra került. A kutatás további fázisában ezért a következő kérdésekre helyeződött a hangsúly:

- (1) A hidrotermás folyamatok milyen mértékben vettek részt a „szulfidszegény” feküércesedések kialakításában?
- (2) Milyen fázisai voltak a SMK-hoz kapcsolódó hidrotermás rendszernek?
- (3) Milyen tulajdonságokkal rendelkezett az SMK-hoz kapcsolódó hidrotermás rendszer, és hogyan fejlődött?
- (4) Mi befolyásolta az ásványtársulások és a platinafém-dúsulás elterjedését?
- (5) Mik voltak a jellemzői és a kiterjedése a fiatalabb hidrotermás rendszereknek?

A kutatás a Sudbury-szerkezet számos területét érintette, közülük az északi vonulat Wisner területén és a keleti vonulat Amy Lake PGE zónájában történt részletes vizsgálat. Mivel a szakirodalomban fellelhető munkák túlnyomó része az északi vonulat ún. Onaping-Levack körzetére koncentrált, a Sudbury-szerkezet kiterjedését figyelembe véve különösen fontos, hogy a Sudbury Hidrotermás Esemény jellegzetességei más területeken is meghatározásra kerüljenek. Annál is inkább, mivel az utóbbi 10 évben az érc kutatás fókuszja az északi vonulatról áttevődött a keleti vonulatra, ahonnan pedig napjainkig igen kevés publikáció született.

Ezen kérdések megválaszolása nem csak a sudbury-i érc körzet szempontjából fontos, mivel a mafikus intrúziók környezetéből leírt hidrotermás eredetű szulfidszegény, nagy platinafém tartalmú átalakulási zónák száma egyre nő (pl. Grokhovskaya, 2010; Campos-Alvarez et al., 2011). A Sudbury-szerkezetben megfigyelt folyamatok tehát egy univerzális modell kidolgozását, és ezen keresztül a hidrotermás horizontok globális kutatását segíthetik elő.

Alkalmazott vizsgálati módszerek

Geológiai térképezést végeztem a Wallbridge Mining Company Ltd. tulajdonában lévő számos területen, amely során a litológia és/vagy hidrotermás átalakulás és törésszerkezetek kerültek rögzítésre. Három ércesedett zónáról készült részletes átalakulási térkép 1:50–1:75 méretarányban. A vizsgált átalakulások összevetésre kerültek a Sudbury-szerkezet más területein megfigyelhető ásványtársulásokkal, ahol nagyléptékű (1:2000–1:5000) térképezés történt, illetve az ércesedett területeken mélyült fúrások anyagával.

Az teljeskörű- és fűrómag-elemzések az ALS Chemex Ltd. vancouveri laboratóriumában készültek. Az elektronmikroszkopos mérések döntő többségben a Carleton University (Ottawa, Kanada) Camebax MBX készülékével történt hullámhossz-diszperzív detektálással (szilikátok: 15kV, 15nA; platinafém ásványok és szulfidok: 20kV, 35nA; mérési idő 15-20 mp vagy 40000 beütés, kivéve F 40 mp, Ni 60 mp). Epidot mérések szintén történtek a Montanuniversität Leoben (Ausztria) JEOL JXA 8200 típusú műszerén (hullámhossz-diszperzív detektálás, 15kV, 20nA), illetve amfibol ásványok lineáris profilok mentén való vizsgálatát végeztem a Karl-Francens-Universität Graz (Ausztria) JEOL SEM 6310 elektronmikroszkópjára csatolt energia- és hullámhossz-diszperzív rendszerén (15kV, 15nA).

Epidot és allanit szemcsék in situ nyomelem-meghatározás LA-ICP-MS segítségével történt a Kanadai Geológiai Szolgálat laboratóriumában (Ottawa), egy Agilent 7700x kvadrupólus ICP-MS-re szerelt ArF lézer használatával. A fluidzárvány-vizsgálatokhoz az ELTE TTK Ásványtani Tanszékén található, hűthető-fűthető tárgyasztallal ellátott Linkam FTIP 600 rendszerét alkalmaztam, illetve feldolgoztam a Wallbridge Mining Company Ltd. az Amy Lake zónára vonatkozó fluidzárvány adatbázisát. Az oxigén, hidrogén és kén stabil izotópjainak mérése az Université de Lausanne (Svájc) laboratóriumában készült CO₂ lézer-fluorinációs (oxigén), nagy hőmérsékletű redukciós (hidrogén) és nagy hőmérsékletű oxidációs (kén) eljárással.

Tézsiek

- (1) A Sudbury-szerkezet északi vonulatán található Wisner South és Southwest zóna, valamint a keleti vonulaton elhelyezkedő Amy Lake PGE zóna hintett-pecsétetes Cu-(Ni-)platinafém ércesedést tár fel, melynek uralkodó szulfidásványai a kalkopirit, millerit és pirit. A szulfidásványok jellegzetes szövete és összetétele mellett a területekhez kapcsolódó Cu, Ni és nemesfémek koncentrációjának, tenorjának és arányának eloszlása azt támasztja alá, hogy a három ércesedett terület a sudbury-i feküércesedések „szulfidszegény” altípusát képviseli.

- (2) Az átalakulások részletes térképezése, az ásványok fő- és nyomelem vizsgálatai, valamint szöveti és fluidzárvány bizonyítékok alapján feltételezhető, hogy a döntően magmás „szulfidtelér-rendszer” altípussal szemben a „szulfidszegény” ércesedés kialakulása tisztán hidrotermás folyamatoknak köszönhető.
- (3) SMK fekéjének hidrotermás átalakulása a vizsgált területeken döntően két, időben eltérő hidrotermás esemény hatására jött létre: az idősebb áramlási rendszer a SMK hője által generált, ércképző hidrotermás eseményhez kapcsolódik, míg az azt felülbélyegző hidrotermás rendszer nagyobb kiterjedéssel bírt, de ércdúsulást nem eredményezett. A kutatás eredményeképpen e két rendszerhez kapcsolódó ásványegyüttesek szöveti, szerkezeti és ásványos összetételük alapján biztonsággal elkülöníthetők egymástól, amely megkönnyíti a térségben folyó, fekéjércesedésekre irányuló nyersanyagkutatást.
- (4) A Sudbury Hidrotermás Esemény a fekéjőzetek komplex átalakulását eredményezte. A rendszerhez kötődő ásványegyüttesek egy részének azonosítása és az ércképződéshez kötése, illetve a megfigyelt ásványegyüttesek részletes dokumentációja jelen dolgozat keretei között történt meg először. Az elkülönített ásványtársulások regionálisan hasonló jellemzőkkel bírnak, ami arra enged következtetni, hogy alapvetően hasonló hidrotermás folyamatok játszódhattak le a Sudbury-szerkezet különböző pontjain.
- (5) A Sudbury Hidrotermás Eseményhez köthető legkorábbi átalakulás a fekéjgranofirból a fekében lokálisan szegregálódó fluidumhoz kapcsolódott (*fekéjgranofirhoz kapcsolódó epidot-amfibol átalakulás*). A paragenezis meghatározó ásványa az allanit, epidot és amfibol, elkülönítő szöveti bélyege a kettős átalakulási udvar a mellékkőzetben, illetve az epidot jellegzetes zónássága és durva szemcsemérete. Az ásványegyüttes mind a granofirhoz fizikailag kapcsolódóan, mind attól elszakadva, külön zónákat/ereket alkotva megfigyelhető. Nagy Ni/Cu és PGE/S arány jellemzi, amely az ásványos összetételben és az ásványok fő- és nyomelem-tartalmában is megmutatkozik. Az átalakulástípus felismerése alátámasztja Molnár et al. (2001) és Péntek et al. (2009) fekéjgranofirokon végzett vizsgálatait, amelyek a granofirból szegregálódott fluidum ércképző potenciálját hangsúlyozzák.
- (6) A Sudbury Hidrotermás Esemény fő szakaszához többféle átalakulás kapcsolódik. Az *extenziós erek* kitöltése szintektonikus, antitaxiális szövetű és a mellékkőzet összetételével erősen változik. A fő ásványfázisok alapján (1) amfibol, (2) epidot-kvarc és (3) kvarc erek különíthetők el. A *hidrotermás szulfid-szilikát ásványegyüttesben* a kalkopirit mellett változó mennyiségű pirit és

millierit van jelen. A szulfidtömeget poikilites epidotból, főképp aktinolitosszerű, nagy Ni-tartalmú amfibolból, és esetenként sajáthalakú, Ni-dús kloritból, valamint kvarcból álló szilikátszegény övezi. Az epidot jellegzetesen „szivacsos” szövetű a nagy mennyiségű kalkopirit, galenit és platinaásvány zárvány miatt, zónássága szabálytalan, „foltos”. Megjelenése egyértelműen azonosítja az ércképző hidrotermális rendszert. A kutatás eredménye hangsúlyozza, hogy a „szulfidszegény” rendszerek nem csupán a szulfid-szilikát együtteseket, hanem a rendszerint szulfidmentes extenziós ereket is magukba foglalják, amelyek zónás elrendezésben kísérik az ércesedést.

- (7) A SMK által hajtott fluidumok áramlása egy tektonikailag aktív környezetben, a Sudbury-szerkezet kialakulásához és stabilizációjához köthető törési szerkezetek mentén történt. A Wisner South és Southwest, valamint az Amy Lake zónában alapvetően az ÉÉNy-DDK-i, illetve az ÉNy-DK-i szerkezetek játszottak legnagyobb szerepet a fluidmigrációban.
- (8) A vizsgált területeken kimutatott nagy hőmérsékletű (>400°C), nagy szalinitású (35–68 NaCl ekvivalens súly%), Na-Fe-Ca-K-Cl-gazdag Sudbury hidrotermális fluidum tulajdonságai jó összhangban állnak azokkal a „magma-hidrotermális” fluidrendszerrel, amelyeket a Sudbury-szerkezet északi és déli vonulatából dokumentáltak (pl., Li és Naldrett, 1993; Farrow et al., 1994; Marshall et al., 1999; Molnár et al., 1997, 1999, 2001; Hanley et al. 2005; Péntek et al., 2008). Bár képződési helyük eltér, fluidzárvány és nyomelem vizsgálatok tanúsága szerint a fektügranofirból szegregálódott és a hidrotermális esemény fő fázisához kapcsolódó fluidumok egyöntetűen magma-hidrotermális eredetűek, és valószínűleg a Kanadai-pajzsra jellemző, nagy szalinitású formációvizekkel keveredtek. Hasonló keveredési folyamat feltételezhető az Onaping-Levack körzetben (Marshall et al., 1999; Hanley et al., 2011).
- (9) A „szulfidszegény” rendszert kialakító hidrotermális fluidum fejlődésében a fluid-kőzet kölcsönhatás meghatározó szerepet játszott. A folyamat legfontosabb következményei a következők: (1) az extenziós értípusok zonációja; (2) a szulfidércesedés megjelenése vagy hiánya a mellékkőzet típusa függvényében; (3) nyomelemek dúsulása vagy hiánya az ásványfázisokban és ásványegyüttesekben; (4) az epidottal egyensúlyban lévő fluidum számolt oxigénizotópos értékeinek szisztematikussá eltolódása a mellékkőzet oxigénizotóp-arányának irányába.

- (10) Minden vizsgált ércesedett területre hasonló nyomelem-populáció jellemző: Pd, Pt, Bi, Te, Ag, Au, Se, Pb, Sn és As, utóbbi csak az Amy Lake zónában jelenik meg. Az elemek koncentrációja és ásványfázisai azonban területenként eltérőek. A Wisner South zóna változatos nemesfém ásványaival ellentétben (pl. merenskyit, moncheit, malyshevit, lisiguangit, bohdanowiczit), a Wisner Southwest zónában kizárólag merenskyit van jelen, ritkán elektrum és hessit társaságában. Az Amy Lake zónában a nemesfém ásványok populációja a befogadó ásványfázisok illetve lelőhelyek függvényében eltérő. Változatosságuk az anyaoldat in situ fejlődését körvonalazza, ahol a korai Ni(-Fe)-szulfid fázishoz Au, Pd, Se, Ag, Te, Bi, Pb, Pt és As kapcsolódik, az azt felülbélyegző Cu-szulfid fázisban pedig a terület északi részén főképp Ag, Bi, Se, Te, Pb, kisebb mértékben Pd, As és Pt jelenik meg. A Déli feltárás környéke a Cu-szulfid fázis Ag-, Se- és Te-szegény zónáját képviseli.
- (11) Az Amy Lake területen a fekügranofirhoz kapcsolódó átalakulás pervazív zónáiban és a szulfid-szilikát paragenezis szilikátszegélyében a Pt erőteljes dúsulása figyelhető meg a palládiumhoz képest. Ezekben a szilikátos együttesekben a Pt sperrylitben, Pt-gazdag merenskyitben és moncheitben van jelen, míg a szulfidásványokban sperrylit mellett megjelenő merenskyit gyakorlatilag Pt-mentes. A Pt és Pd ezen elkülönülésében valószínűleg a területeken nagy koncentrációban megjelenő arzénnek van szerepe.
- (12) A kutatás három olyan tényező fontosságát hangsúlyozza, amely a „szulfidszegény” ércesedések kialakulását és elterjedését befolyásolja. (1) *Fémforrás*. A Sudbury hidrotermás rendszer képes volt a fémek mobilizációjára és szállítására, de „szulfidszegény” ércesedés csak azokon a területeken van jelen, ahol már létező szulfidércesedések (pl. kontakt Ni-Cu telepek) fémforrásként szolgáltak. Olyan területeken, ahol nincsenek ilyen fémforrások, a hidrotermás rendszer megjelenhet, de nem eredményez „szulfidszegény” feküközeti ércesedést (pl. Trill, Foy, Skynner Lake). (2) *Szerkezeti kontroll*. A hidrotermás fluidumok a feküösszetbe rideg törésszerkezetek mentén migrálva jutottak ki, amik a Sudbury-szerkezet képződésének és stabilizálódásának eredményeképpen jöttek létre. A Sudbury Breccsa övek reológiaiuk folytán elősegítették a törések kialakulását és ezzel a fluidmigrációt. A hidrotermás fluidumok a fémforrástól a „szulfidszegény” ércesedés kialakulásáig több száz métert is megtehettek. (3) *Csapdázódási környezet*. A vizsgált területeken a mafikus-intermedier feküközetek és a Sudbury Breccsa mátrixa bizonyult kedvezőnek az ércesedés kialakulása szempontjából.

- (13) A Sudbury Hidrotermás Esemény ásványegyüttesei mellett egy másik, fiatalabb hidrotermás átalakulás is megfigyelhető regionálisan. A *nyírásos epidot-kvarc erek* legfőbb ismertetőjegye a változatos szövet, amely minden esetben jól jelzi a nyírásos eredetet. Igen elterjedt ásványegyüttes, amelyet Ca-Na-Fe-gazdag, mérsékelt hőmérsékletű (200–250°C) és nagy szalinitású (33–35 NaCl ekvivalens súly%) fluidumok hoztak létre. A fluidumhoz kapcsolódó fluid-kőzet kölcsönhatás valószínűleg elhanyagolható, fém mobilizációs képessége erősen limitált volt. Az erek É–D-i és ÉK–DNy-i csapása csaknem változatlan a Sudbury-szerkezet eltérő pontjain, ami azt jelzi, hogy létrejöttük az utolsó nagy szerkezeti módosulások utánra tehető. Ez egybevág Molnár et al. (2001) feltételezésével, aki hasonló ásványos összetételű ereket a Sudbury telérraj 1.24 milliárd éves keletkezésével hozott összefüggésbe. Jelen dolgozat az első részletes petrográfiai és szerkezeti dokumentációja ennek a hidrotermás ásványegyüttesnek.
- (14) A *kalcit-klorit átalakulás* a legfiatalabb megfigyelt hidrotermás paragenézis. Bár igen elterjedt, volumenét tekintve a többi tárgyalt hidrotermás ásványegyütteshez képest jelentéktelen. Megjelenése kis hőmérsékletű (<170°C) és szalinitású (14–26 CaCl₂ ekvivalens súly%), Ca-gazdag oldatoknak köszönhető, melyeket a Sudbury-szerkezet más területeiről is említene (Molnár et al., 2001).
- (15) A kutatás részeként különböző ásványegyüttesekből származó hidrotermás epidotásványok nyomelem vizsgálata történt meg, amely a hasonló adatok ritkaságát tekintve igen nagy jelentőséggel bír. A vizsgált mintákban az epidot és allanit nyomelem-eloszlását alapvetően három tényező befolyásolta, (1) a fluidum tulajdonságai (RFF, Ni, Co, Th, U, Pb), (2) a mellékkőzet összetétele (könnyű RFF, Ti), és/vagy (3) az ásványok kristályszerkezete (pl. LILE, Mg, Ti).

Irodalomjegyzék

- Ames, D.E., Gibson, H.L., 1995, Controls on and geological setting of regional hydrothermal alteration within the Onaping Formation, footwall to the Errington and Vermilion base metal deposits, Sudbury Structure, Ontario: Geological Survey of Canada Current Research 1995-E, p. 161–173.
- Ames, D.E., Farrow, C.E.G., 2007, Metallogeny of the Sudbury mining camp, Ontario: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, p. 329–350.
- Ames, D.E., Watkinson, D.H., Parrish, R.R., 1998, Dating of a regional hydrothermal system induced by the 1850 Ma Sudbury impact event: *Geology*, v. 26, p. 447–450.
- Campos-Alvarez, N.O., Samson, I.M., Fryer, B.J., 2011, The roles of magmatic and hydrothermal processes in PGE mineralization, Ferguson Lake deposit, Nunavut, Canada: *Mineralium Deposita*, DOI: 10.1007/s00126-011-0385-0
- Everest, J.O., 1999, The relationship of Cu-Ni-PGE veins in the Levack Gneiss Complex to contact magmatic ore at the McCreedy West mine, Sudbury: kiadatlan M.Sc. dolgozat, Carleton University, Ottawa, Kanada, 125 p.
- Farrow, C.E.G., 1994, Geology, alteration, and the role of fluids in Cu-Ni-PGE mineralization of the footwall rocks to the Sudbury Igneous Complex, Levack and Morgan Townships, Sudbury District, Ontario: kiadatlan Ph.D. dolgozat, Carleton University, Ottawa, Kanada, 373 p.
- Farrow, C.E.G., Watkinson, D.H., 1992, Alteration and the role of fluids in Ni, Cu and platinum-group element deposition, Sudbury Igneous Complex Contact, Onaping-Levack area, Ontario: *Mineralogy and Petrology*, v. 46, p. 67–83.
- Farrow, C.E.G., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 1994, Fluid inclusions in sulfides from North and South range Cu-Ni-PGE deposits, Sudbury structure, Ontario: *Economic Geology*, v. 89, p. 647–655.
- Farrow, C.E.G., Everest, J.O., King, D.M., Jolette, C., 2005, Sudbury Cu-(Ni)-PGE systems: Refining the classification using McCreedy West mine and Podolsky project case studies: *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series* v. 35, p. 163–180.
- Grokhovskaya, T.L., 2010, PGE distribution and PGM assemblages in low-sulfide PGE deposits of the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Peninsula, Russia (abs): 11th International Platinum Symposium, June 2010, Sudbury, Kanada (CD-ROM)
- Hanley, J.J., Mungall, J.E., Pettke, T., Spooner, E.T.C., Bray, C.J., 2005, Ore metal redistribution by hydrocarbon-brine and hydrocarbon-halide melt phases, North Range footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: *Mineralium Deposita*, v. 40, p. 237–256.
- Hanley, J., Ames, D., Barnes, J., Sharp, Z., Guillong, M., 2011, Interaction of magmatic fluids and silicate melt residues with saline groundwater in the footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: New evidence from bulk rock geochemistry, fluid inclusions and stable isotopes: *Chemical Geology*, v. 281, p. 1–25.
- Jago, B.C., Morrison, G.G., Little, T.L., 1994, Metal zonation patterns and microtextural and micromineralogical evidence for alkali- and halogen-rich fluids in the genesis of the Victor Deep and McCreedy East footwall copper orebodies, Sudbury Igneous Complex: Ontario Geological Survey Special Volume 5, p. 65–75.

- Kjarsgaard, I.M., Ames, D.E., 2010, Ore mineralogy of Cu-Ni-PGE deposits in the North Range footwall environment, Sudbury (abs): 11th International Platinum Symposium, June 2010, Sudbury, Kanada (CD-ROM)
- Leshner, C.M., Golightly, J.P., Gregory, S.K., Stout, A.E., 2009, Dynamic remelting and zone refining of Ni-Cu-PGE mineralization in the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada (abs.): Proceedings of the Xi'an International Ni-Cu-(Pt) Symposium, *Northwestern Geology*, v. 42, p. 157–160.
- Li, C., Naldrett, A.J., 1993, High chlorine alteration minerals and calcium-rich brines in fluid inclusions from the Strathcona Deep Copper Zone, Sudbury, Ontario: *Economic Geology*, v. 88, p. 1780–1796.
- Marshall, D.D., Watkinson, D.H., Farrow, C.E.G., Molnár, F., Fouillac, A.M., 1999, Multiple fluid generations in the Sudbury Igneous Complex: Fluid inclusion, Ar, O, H, Rb and Sr evidence: *Chemical Geology*, v. 154, p. 1–19.
- Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., Gatter, I., 1997, Fluid inclusion evidence for hydrothermal enrichment of magmatic ore at the contact zone of the Ni-Cu-platinum-group element 4b deposit, Lindsley mine, Sudbury, Canada: *Economic Geology*, v. 92, p. 674–685.
- Molnár, F., Watkinson, D.H., Everest, J.O., 1999, Fluid-inclusion characteristics of hydrothermal Cu-Ni-PGE veins in granitic and metavolcanic rocks at the contact of the Little Stobie deposit, Sudbury, Canada: *Chemical Geology*, v. 154, p. 279–301.
- Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2001, Multiple hydrothermal processes in footwall units of the North Range, Sudbury Igneous Complex, Canada, and implications for the genesis of vein-type Cu-Ni-PGE deposits: *Economic Geology*, v. 96, p. 1645–1670.
- Morrison, G.G., Jago, B.C., White, T.L., 1994, Footwall mineralization of the Sudbury Igneous Complex: Ontario Geological Survey Special Volume 5, p. 57–63.
- Nelles, E.W., Leshner, C.M., Lafrance, B., 2010, Mineralogy and textures of Cu-PPGE-Au-rich mineralization in the Morrison (Levack footwall) Deposit, Sudbury, Ontario (abs): Society of Economic Geologists 2010 Conference, October 2010, Keystone, USA (CD-ROM)
- Péntek, A., Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2008, Footwall-type Cu-Ni-PGE mineralization in the Broken Hammer area, Wisner township, North Range, Sudbury structure: *Economic Geology*, v. 103, p. 1005–1028.
- Péntek, A., Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., Mogessie, A., 2009, Partial melting and melt segregation in footwall units within the contact aureole of the Sudbury Igneous Complex (North and East Ranges, Sudbury structure), with implications for their relationship to footwall Cu-Ni-PGE mineralization: *International Geology Review*, DOI:10.1080/00206810903101313
- Péntek, A., Molnár, F., Tuba, Gy., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2012, The significance of partial melting processes in hydrothermal 'low-sulfide' Cu-Ni-PGE mineralization within the footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: *Economic Geology*, *in press*
- Tuba, Gy., Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., Mogessie, A., 2010, Hydrothermal vein and alteration assemblages associated with low-sulfide footwall Cu-Ni-PGE mineralization and regional hydrothermal processes, North and East Ranges, Sudbury structure, Canada: Society of Economic Geologists Special Publication, v. 15, p. 573–598.

A szerző publikációi a témában

Nemzetközi folyóiratokban megjelent cikkek

Tuba, Gy., Molnár, F., Ames, D.A., Péntek, A., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2012, Multi-stage hydrothermal processes involved in 'low-sulfide' Cu(-Ni)-PGE mineralization in the footwall of the Sudbury Igneous Complex (Canada): Amy Lake PGE zone, East Range: Mineralium Deposita, *beküldve*

Péntek, A., Molnár, F., **Tuba, Gy.**, Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2012, The significance of partial melting processes in hydrothermal 'low-sulfide' Cu-Ni-PGE mineralization within the footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: Economic Geology, *in press*

Tuba, Gy., Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2010, Characterization of hydrothermal vein and alteration assemblages associated with 'low-sulfide' footwall Cu-Ni-PGE mineralization and regional hydrothermal processes, North and East Ranges, Sudbury structure, Canada: SEG Special Publication 15, p. 573–598.

Bővített konferencia absztraktok

Tuba, Gy., Molnár, F., Watkinson, D.H., Jones, P.C., 2010, Distinguishing hydrothermal assemblages associated with and post-dating 'low-sulfide' Cu-Ni-PGE mineralization in the footwall of the Sudbury Igneous Complex: a possible tool in mineral exploration: 11th International Platinum Symposium, 2010, Sudbury, Canada

Péntek, A., Molnár, F., Watkinson, D.H., **Tuba, Gy.**, Jones, P.C., 2010, The significance of partial melting processes in hydrothermal 'low-sulfide' mineralization within the footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: 11th International Platinum Symposium, 2010, Sudbury, Canada

Absztraktok

Tuba, Gy., Molnár, F., Watkinson, D.H., Mogessie, A., Jones, P.C., 2009, Characterization of hydrothermal alteration assemblages of 'low-sulfide' Cu-Ni-PGE mineralization (Wisner area, Sudbury structure, Canada): Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft 155, p. 165.